

Орієнтовані графи як математичний апарат опису дефектів філаменту 3D друку

Гапон Н. Я., Зайченко О. Б.

Харківський національний університет радіоелектроніки, м. Харків, Україна

E-mail: olha.zaichenko@nure.ua

Досліджено дефекти філаменту за допомогою графічних моделей, таких як орієнтовані графи. Об'єктом дослідження є графічна модель дефекту філаменту для 3D друку. Встановлено, що метод Ніколсона-Роса-Вейра, який використовується в серійних векторних аналізаторах для вимірювання параметрів діелектриків, може бути використаний для створення моделей дефектів філаменту для 3D друку. В основі запропонованого методу лежить модель у вигляді орієнтованих графів. Удосконалення методу Ніколсона-Роса-Вейра полягає в розвитку графічної моделі за рахунок додавання дефекта у вигляді частини орієнтованого графа. Аналіз моделі, побудованої на базі орієнтованих графів, виявив, що коефіцієнт передачі S_{21} є частиною коефіцієнта відбиття S_{11} , що доцільно під час розв'язання системи нелінійних рівнянь для S_{11} та S_{21} . Створено графічну модель, яка відрізняється тим, що враховує дефекти діелектриків, тобто філаменту. Перехід від графічної моделі до аналітичної здійснюється, використовуючи методи спрощення або редукції орієнтованих графів, зокрема топологічний метод за правилами Кюна та алгебраїчний метод, з урахуванням правила неторкаючихся контурів Мезона. В результаті отримані аналітичні вирази для коефіцієнта передачі орієнтованого графа, що є моделлю діелектрика з дефектом всередині. Використання двох незалежних топологічного та алгебраїчного методів, а також розгляд окремого випадку, коли коефіцієнт відбиття дефекту дорівнює нулю, дозволяє верифікувати отримані вирази для елементів матриці розсіювання S_{11} та S_{21} . Використовуючи метод аналогій класичного методу Ніколсона-Роса-Вейра і того ж методу з врахуванням дефекту для матеріалу філаменту, виведна аналітична залежність, яка пов'язує S_{21} та S_{11} функціональним співвідношенням.

Ключові слова: орієнтовані графи; коефіцієнт передачі; коефіцієнт відбиття; діелектрик; дефект

DOI: [10.20535/RADAP.2024.96.42-49](https://doi.org/10.20535/RADAP.2024.96.42-49)

Вступ

Упродовж останнього десятиліття технології швидкого прототипування стали широко використовуватися. Промислові гіганти, такі як General Electric та Siemens, активно впроваджують ці технології і відкривають дослідні центри в різних країнах.

3D-друк використовується для виробництва дуже широкого спектра речей: від прототипів деталей для систем авіоніки та промислового обладнання, друку імплантатів в медицині та хірургії, і до цілого ряду предметів побуту, гаджетів та іграшок. Якість 3D друку залежить від численних параметрів, зокрема якість використаних матеріалів має вирішальне значення.

Визначення електромагнітних властивостей матеріалів на мікрохвильових частотах завжди є об'єктом великого інтересу через актуальність цих вимірювань для проектування та виробництва. Велика кількість різних високочастотних методів визначення характеристик діелектриків почала

з'являтися в літературі з 1950-х років. Останніми роками з'явилися нові матеріали та технології виробництва, наприклад, можливість друку діелектричних структур складної форми. З цих причин в останні роки інтерес до визначення характеристик провідних і діелектричних матеріалів було відроджено.

Підвищуються вимоги до контролю параметрів діелектричних матеріалів, що використовуються в надвисокочастотній (НВЧ) електроніці: підкладинок для пристроїв, реалізованих за мікросмужковою технологією; обтічників антен та ін. В даний час відомі три основні методи вимірювання діелектричних властивостей матеріалів у НВЧ діапазоні частот: 1) резонансний метод; 2) нерезонансний метод; 3) метод вільного простору.

Метою дослідження є удосконалення моделі і методу визначення параметрів дефектів філаменту 3D друку на базі метода Ніколсона-Роса-Вейра та орієнтованих графів, яка відрізняється тим, що враховує дефекти діелектриків, тобто філаменту.

1 Стан та перспективи використання графічних моделей в методі Ніколсона-Роса-Вейра

1.1 Аналіз досліджень і публікацій

Метод передачі/відбиття [1] призначено для визначення внутрішніх електромагнітних властивостей невідомих матеріалів, відносна діелектрична проникність яких не дорівнює одиниці. Коефіцієнти відбиття і пропускання вимірюються одночасно і дозволяють визначити електричну та магнітну проникності [8].

В [9] запропоновано новий метод для точного вимірювання діелектричної проникності кераміки і полімерів при частоті міліметрового діапазону, який використовує хвилі типу H_{01} круглого хвилеводу. Вимірювання діелектричної проникності матеріалів стає надзвичайно складною за допомогою основної моди H_{10} прямокутного хвилеводу. Із збільшенням частоти розміри діелектричного зразка, який потрібно вмістити у прямокутний хвилевід, стають дуже малим. Таким чином, невеликі дефекти виготовлення створюють повітряні зазори між зразком і стінкою прямокутного хвилеводу призводять до значної помилки під час вимірювань. Навпаки режим H_{01} круглого хвилеводу нечутлива до дрібних дефектів під час виготовлення.

В [10] проведено комплексний аналітичний огляд методів розрахунку нормалізованих спектрів потужності для визначення ефективних комплексних діелектричних властивостей зразка. Виведено три загальні моделі характеристики потужності (нульового порядку, поширення потужності та поширення електричного поля). Ці моделі діють як узагальнена математична основа. Завдяки уніфікованому інженерному підходу моделі поширення хвилі напруги, лінії передачі та телеграфного рівняння лінії передачі виводяться незалежно. Перші два дають однакові математичні рішення, тоді як третій генерує ті самі численні результати, що й точна модель поширення електричного поля. Показано, як розрахувати діелектричні властивості за допомогою спектроскопії в часовій області, а також точні значення знайдені за допомогою теоретичних графічних методів на основі коефіцієнтів відбиття та пропускання першого порядку.

В [11] представлено спрощену процедуру характеристики матеріалу методом Ніколсона-Роса-Вейра, яка використовує однопортовий аналізатор кіл для збору даних. Цей підхід особливо привабливий для вимірювань у мікрохвильовому та терагерцовому діапазоні, оскільки він усуває потребу в дорогому двопортовому обладнанні, необхідному для традиційного методу Ніколсона-Роса-Вейра. Подібно до добре відомих методів, використано два послідовних калібрування портів. Згодом можна використовувати звичайну процедуру Ніколсона-Роса-

Вейра для одночасного визначення діелектричної та магнітної проникності досліджуваного матеріалу. Продемонстровано підхід для хвилеводу WR8.0 частотного діапазону 90-140 ГГц.

Серед засобів математичного опису мікрохвильових пристроїв використовується як електродинаміка, так і теорія надвисокочастотних (НВЧ) кіл, яка використовує орієнтовані графи та способи їх редукції [5-7]. Орієнтовані графи – це символічний графічний спосіб для представлення лінійного рівняння. Орієнтований граф складається з гілок (спрямованих шляхів), що містять значення, і з'єднань шляхів, які називають вузлами. Кожна змінна представлена вузлом, і кожній гілці присвоюється значення коефіцієнта, що зв'язує кінцеві змінні.

Лінійне коло є системою каскадних кіл, чий загальний орієнтований граф будується шляхом об'єднання орієнтованих графів окремих кіл. Відповідний орієнтований граф особливо доречний, коли кола представлені матрицею розсіювання. Набори параметрів, які зазвичай використовуються для характеристики чотириполюсників, це Z-параметри, Y-параметри і S-параметри. Зазвичай S-параметри використовуються у мікрохвильовій області, де проводити прямі вимірювання напруги та струму нерезально.

Після побудови орієнтованого графа залишається проблема знаходження значення хвилі в певному вузлі. Рішення для лінійних кіл можуть бути досягнуті серією топологічних маніпуляцій, або обчислені за допомогою або алгебраїчних, або числових методів, які зводять орієнтований граф до простішої форми. Ці методи називаються методами редукції орієнтованих графів. Призначення методів редукції орієнтованого графа полягає в тому, щоб скоротити загалом складний орієнтований граф до однієї гілки, що з'єднує дві змінні. Існує три широко використовувані методи скорочення орієнтованих графів: топологічний, алгебраїчний та матричний, які наведено нижче.

Топологічний метод, заснований на чотирьох правилах, наданих Кюном (Рис. 1). Ці правила застосовуються послідовно, щоб звести складний орієнтований граф до простого, що зводиться до одного шляху, що з'єднує два вузли. Чотири правила [12]:

1. Гілки в рядах перемножують.
2. Гілки паралельно додають. Для паралельності стрілки повинні вказувати однаковий напрямок. Якщо вони спрямовані в протилежні сторони, може утворитися петля дублювання вузла згідно з правилом 4.
3. Цикл значення K приєднаний до вузла, можна усунути, розділивши всі гілки, які входять до цього вузла на 1-K.
4. Вузол може бути продубльований за умови, що кожен шлях на вихідному графі залишається. Кон-

тури, які приєднані до дубльованого вузла, також будуть дубльовані.

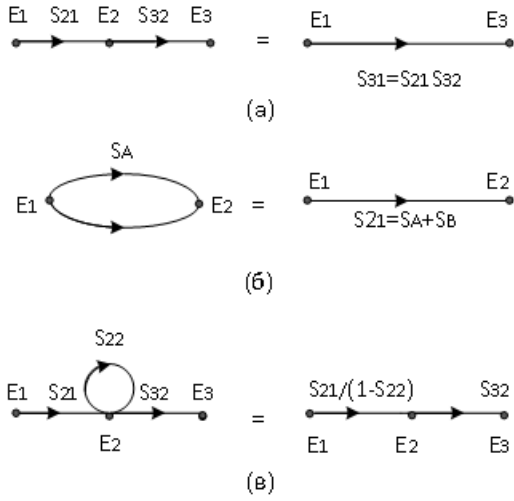


Рис. 1. Правила редукції: а) гілки послідовно; б) гілки паралельно; в) редукція петлі зворотного зв'язку

Алгебраїчний метод редукції орієнтованих графів заснований на правилі Мезона неторкаючихся контурів [13]

$$T = \frac{P_1 \left(1 - \sum^1 L_1 + \sum^1 L_2 - \dots\right) + P_2 \left(1 - \sum^2 L_1 + \dots\right)}{1 - \sum L_1 + \sum L_2}, \quad (1)$$

де T – коефіцієнт передачі, що з'єднує дві змінні (тобто $b = Ta$), P_1 – один шлях від a до b ; P_2 – другий шлях від a до b тощо; $\sum L_1$ – сума всіх контурів першого порядку; $\sum L_2$ – сума всіх контурів другого порядку тощо; $\sum^1 L_1$ – сума всіх контурів першого порядку, які не торкаються P_1 ; $\sum^1 L_2$ – сума всіх контурів другого порядку, які не торкаються P_1 ; $\sum^2 L_1$ – сума всіх контурів першого порядку, які не торкаються P_2 ; $\sum^2 L_2$ – сума всіх контурів другого порядку, які не торкаються P_2 тощо.

Шлях – це добуток усіх гілок, які зустрічаються на шляху за вказівками стрілок і шлях не проходить жодного вузла більше одного разу. Може бути декілька різних шляхів від вузла a до вузла b . Контур першого порядку – це шлях у напрямках стрілок, який не проходить один вузол більше одного разу. Його коефіцієнт передачі – добуток усіх пройдених гілок. Цикл другого порядку є добутком будь-яких двох циклів першого порядку контурів, які не торкаються в жодній точці. Цикл третього порядку є добутком трьох контурів першого порядку, що не торкаються, і так далі.

Матричний метод редукції орієнтованого графа [12] дуже простий та ефективний метод, який особливо підходить для реалізації на комп'ютері. N вузлів у орієнтованому графі пронумеровано від 1 до N . Формується матриця $N \times N$ із значенням гілки S_{ij} у позиції i, j . Якщо бажано знайти відношення

сигналу в q -му вузлі t_j , то в p -му вузлі матриця потім доповнюється додатковим $(N + 1)$ -го рядка і стовпцем, що містять нулі, за винятком позиції $(q, N + 1)$ та $(N + 1, p)$, які містять значення 1. Розширена матриця скорочується таким чином. Для $j = 1, \dots, N$ потім для $j + 1, \dots, N + 1$, додається $S_{ij}S_{jk}/(1 - S_{ik})$ для $k = j + 1, \dots, N + 1$. Шукану відповідь дають елементи $S_{N+1, N+1}$. Початкову $N \times N$ підматрицю можна повторно використовувати для визначення передачі між іншою парою вузлів після переміщення записів одиниць у рядку $(N + 1)$ та стовпці $(N + 1)$.

Орієнтований граф, що є моделлю діелектрика в лінії передачі, показаний на Рис. 2.

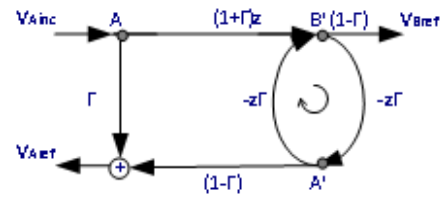


Рис. 2. Орієнтований граф, що є моделлю діелектрика в лінії передачі

На Рис. 2: z – фазова відстань $e^{-\gamma z}$, V_{Aref} – відбита хвиля, V_{Ainc} – падаюча хвиля, γ – модуль коефіцієнта відбиття навантаження.

1.2 Алгоритм Ніколсона-Росса-Вейра

Ніколсон і Росс (1970) та Вейр (1974) разом ввели явні формули для розрахунку діелектричної та магнітної проникності. Алгоритм зазвичай називають алгоритм Ніколсона-Росса-Вейра. Запропонована в роботах Ніколсона та Росса (Nicolson A. M. and Ross G. F.) та Вейра (Weir W. B.) процедура обчислення величин магнітної і діелектричної проникностей з вимірних значень елементів комплексної матриці розсіювання є вбудованою опцією у векторних аналізаторах кіл фірм Agilent Technologies та Rohde and Schwarz. Згідно з алгоритмом Ніколсона-Росса-Вейра [3] коефіцієнт відбиття визначається таким чином

$$S_{11} = \frac{V_A}{V_{inc}} = \frac{(1 - z^2) \Gamma}{1 - \Gamma^2 z^2} \quad (2)$$

та коефіцієнт передачі

$$S_{21} = \frac{V_B}{V_{inc}} = \frac{(1 + \Gamma)(1 - \Gamma)z}{1 - \Gamma^2 z^2} = \frac{(1 - \Gamma^2)z}{1 - \Gamma^2 z^2}. \quad (3)$$

Запис суми та різниці коефіцієнтів розсіювання

$$\begin{aligned} V_1 &= S_{21} + S_{11} \\ V_2 &= S_{21} - S_{11} \end{aligned} \quad (4)$$

та якщо позначити X

$$X = \frac{1 - V_1 V_2}{V_1 - V_2} = \frac{1 - (S_{21} - S_{11})(S_{21} + S_{11})}{S_{21} - S_{11} - S_{21} - S_{11}} = \frac{1 - S_{21}^2 - S_{11}^2}{-2S_{11}}. \quad (5)$$

Потім показано що коефіцієнт відбиття може бути отриманий через X , отже коефіцієнти матриці розсіювання

$$\Gamma = X \pm \sqrt{X^2 - 1}. \quad (6)$$

Цей вираз схожий на рішення квадратного рівняння через детермінант. Коефіцієнт відбиття Γ за визначенням менше одиниці на відміну від коефіцієнта стоячої хвилі. Значення коефіцієнта Γ використовувалась для визначення параметрів діелектриків в [3] та доведено практикою, тому використовується в серійних аналізаторах кіл провідних закордонних фірм. Відомий вираз, який пов'язує коефіцієнт відбиття з параметрами діелектриків,

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} = \frac{\sqrt{\mu_R/\varepsilon_R} - 1}{\sqrt{\mu_R/\varepsilon_R} + 1}. \quad (7)$$

Фізичний зміст такий. На Рис. 3 показано, як виникає хвиля напруги, яка падає на межу розділу $A-A'$, поширюється за наявності зразку матеріалу на шляху розповсюдження. Повну діаграму відбиття можна знайти в [3, 8]. Падаюча хвиля VA_{inc} частково відбивається, а частково передається на межу розділу повітря-зразок $A-A'$, пізніше на межу розділу зразок-повітря $B'-B$, а потім знов в зворотному напрямку на межу зразок-повітря $A'-A$ і так далі. Тому багаторазові відбиття відбуваються в межах зразку. Відбиті хвилі напруги в базових площинах A' і B' , VA_{ref} і VB_{ref} складаються з нескінченної кількості доданків зі зменшенням амплітуди, кількість яких тим більше, чим більше відбиттів всередині зразка відбулося. Цей процес також можна описати орієнтованим графом. На Рис. 2 показано такий орієнтований граф.

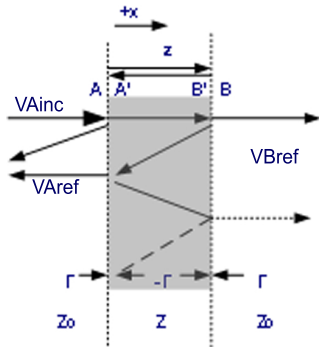


Рис. 3. Схема падаючого сигналу VA_{inc} , відбитого сигналу VA_{ref} і переданого сигналу VB_{ref} з кратною відбиттями всередині зразка [8]

Орієнтований граф дозволяє зв'язати падаючу хвилю з площини A до відбитих хвиль у площинах

A' і B' , з яких можуть бути визначені параметри розсіювання S_{11} і S_{21} . Орієнтований граф на Рис. 2 пов'язує відбиті і передані хвилі VA_{inc} на межі розділу повітря-зразок з площиною A , межу зразок-повітря в площині B' і межу зразок-повітря в площині A' . На межі A падаюча хвиля частково відбивається, що представлено множником Γ . Передана частина також поширюється через зразок товщиною d , який описується множником $(1 + \Gamma)z$. На межі B' коефіцієнт відбиття стає $-\Gamma$, як показано на Рис. 2, що призводить до коефіцієнта $1 - \Gamma$ для переданої частини. Відбита на межі зразок-повітря частина хвилі знову поширюється через зразок з загальним множником $-\Gamma$. Коли частка VA_{inc} потрапляє на межу зразка-повітря A' $1 - \Gamma$ передається і відбита частина знову поширюється через зразок, який описується множником $-\Gamma$. Виникає багаторазове відбиття між B' і A' .

2 Аналіз графічної та аналітичної моделі без дефекту

Аналіз алгоритма Ніколсона-Роса-Вейра показує, що значення Γ є рішенням системи рівнянь (2) та (3). Розв'язання системи двох нелінійних рівнянь відносно елементів матриці розсіювання стає можливим лише завдяки тому, що S_{11} можна виразити через S_{21} і далі виконати підстановку.

Розглянемо формули для S_{11} виведені через правило Мезона без скорочень, спираючись на орієнтований граф на Рис. 2 [3]

$$S_{11} = \frac{(1 + \Gamma)z(-z\Gamma)(1 - \Gamma)}{(1 - \Gamma^2 z^2)} + \Gamma. \quad (8)$$

Приведемо до загального знаменника і розкриємо дужки

$$S_{11} = \frac{(1 - \Gamma^2)(-z^2\Gamma) + \Gamma - \Gamma^3 z^2}{(1 - \Gamma^2 z^2)}, \quad (9)$$

$$S_{11} = \frac{-z^2\Gamma + \Gamma^3 z^2 + \Gamma - \Gamma^3 z^2}{(1 - \Gamma^2 z^2)}. \quad (10)$$

Оскільки доданок $\Gamma^3 z^2$ входить з різними знаками скоротимо його

$$S_{11} = \frac{-z^2\Gamma + \Gamma}{(1 - \Gamma^2 z^2)}. \quad (11)$$

Винесемо спільний множник за дужки

$$S_{11} = \frac{(1 - z^2)\Gamma}{(1 - \Gamma^2 z^2)}. \quad (12)$$

Таким чином, отримано вираз S_{11} , що було потрібно довести. Він повністю співпадає з виразом (2).

Переслідуючи мету розв'язати систему нелінійних рівнянь через метод підстановки, потрібно виразити один елемент матриці розсіювання через

інший. Тому доведемо, що вираз для S_{11} містить вираз для S_{21} , як то витікає з порівняння виразів (2) та (3). Звідси запишемо

$$S_{11} = S_{21}(-z\Gamma) + \Gamma. \quad (13)$$

Тоді отримаємо важливий висновок відносно змінної z , яку виключимо з подальших розрахунків

$$z = \frac{\Gamma - S_{11}}{S_{21}\Gamma}. \quad (14)$$

Підставимо отриманий вираз (14) в формулу (3), звідки отримаємо після переносу знаменника з правої частини рівняння в ліву

$$S_{21}(1 - \Gamma^2 z^2) = (1 - \Gamma^2)z, \quad (15)$$

$$S_{21} \left(1 - \Gamma^2 \left(\frac{\Gamma - S_{11}}{S_{21}\Gamma} \right)^2 \right) = (1 - \Gamma^2) \frac{\Gamma - S_{11}}{S_{21}\Gamma}. \quad (16)$$

Звідси витікає

$$S_{21} \left(1 - \frac{(\Gamma - S_{11})^2}{S_{21}^2} \right) = \frac{(1 - \Gamma^2)(\Gamma - S_{11})}{S_{21}\Gamma}. \quad (17)$$

Приведемо до загального знаменника ліву частину та скоротимо на S_{21}

$$S_{21}^2 - (\Gamma - S_{11})^2 = \frac{(1 - \Gamma^2)(\Gamma - S_{11})}{\Gamma}, \quad (18)$$

маємо таке

$$\begin{aligned} \{S_{21}^2 - (\Gamma^2 - 2\Gamma S_{11} + S_{11}^2)\} \Gamma &= \\ &= \frac{\{\Gamma - \Gamma^3 - S_{11} + \Gamma^2 S_{11}\} \Gamma}{\Gamma}. \end{aligned} \quad (19)$$

Звідси

$$S_{21}^2 \Gamma + 2\Gamma^2 S_{11} - \Gamma S_{11}^2 = \Gamma - S_{11} + \Gamma^2 S_{11}. \quad (20)$$

Після низки перетворень отримуємо

$$\Gamma^2 + \frac{(S_{21}^2 - S_{11}^2 + 1)}{S_{11}} \Gamma - 1 = 0. \quad (21)$$

Це те саме квадратне рівняння, рішення якого передбачалось на основі виразу (6). Його множник при другому доданку є виразом (5) з точністю до знака та коефіцієнту 0,5.

3 Синтез графічної та аналітичної моделі з врахуванням дефекту

Дефектоскопія філаменту полягає у визначенні глибини залягання дефекту та його розкрити,

тобто товщини. Для подальшого дослідження використовується апріорна інформація. Про основний матеріал відомі його електрофізичні параметри та геометричні розміри, навіть це є стандартні величини для певного виду філаменту для 3D друку. Тепер в модель діелектрика у вигляді орієнтованого графа введемо дефект і будемо намагатися для цього більш складного випадку теж виразити S_{11} через S_{21} .

Припустимо, що в передавальному НВЧ тракті розташована ділянка діелектричного філаменту. В філаменті є дефект будь-якої форми, який розташований будь-яким чином. Дефектом може бути як провідник, так і діелектрик. Зауважимо, що від металевого дефекта, на відміну від діелектричного дефекта, падаюча хвиля буде відбиватися. Для конкретизації хвиля на філамент з дефектом надходить з лівого боку. Дефект розташований на філаменті теж зліва. Тобто падаюча хвиля спочатку потрапляє на дефект, де частково передається далі, а частково відбивається. Взаємне розташування дефекта та філаменту може варіюватися, але це можна врахувати не сильно змінюючи модель, яка пропонується далі [13].

На Рис. 4 показаний орієнтований граф з дефектом. Дефект введений як масштабований основний граф з Рис. 2. Проблемою було поєднати їх зі змістом адже цей орієнтований граф з [3] є гібридом з діаграмою Б'юлі, тобто враховує багатократні відбиття (Рис. 3). Фізичний зміст в Рис. 4 вкладено такий. Електромагнітна хвиля, яка потрапляє на зразок частково відбивається, а частково проходить в матеріал філаменту, де теж частково відбивається і частково розповсюджується від дефекта в філаменті.

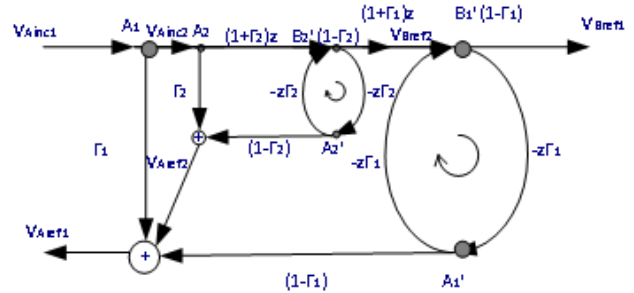


Рис. 4. Орієнтований граф, що є моделлю діелектрика з дефектом в лінії передачі [13]

На Рис. 5 показаний орієнтований граф після проведення редукції за методом Кюна, призначений для визначення S_{11} . Необхідне пояснення до Рис. 5 полягає в тому, що тут нижня гілка знизу ліворуч на вході V_{Aref} перенесена на вихід праворуч Рис. 5 для зручності аналогічно Рис. 6 з [8], але від цього перенесення вона не перестала уособлювати відбиту хвилю на вході. При цьому V_{Bref} , чиє місце V_{Aref} зайняло на рисунку, на цьому кроці не розглядається і ним поки що нехтують.

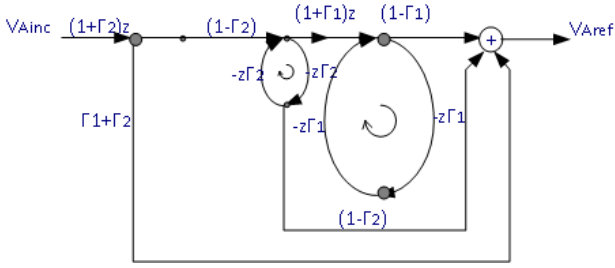


Рис. 5. Орієнтований граф для визначення елемента матриці розсіювання S_{11}

На Рис. 6 показаний орієнтований граф після проведення редукції за методом Кюна, призначений для визначення S_{11} .

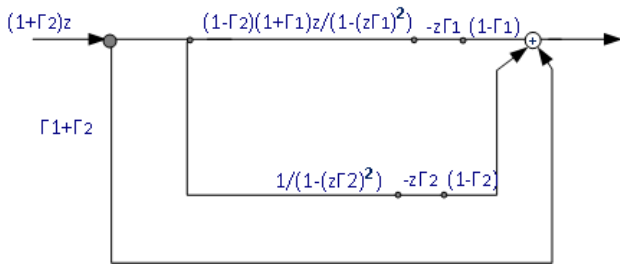


Рис. 6. Редукований орієнтований граф для S_{11} позбавлений від контурів за третім топологічним правилом Кюна

На Рис. 7 показаний орієнтований граф для визначення S_{11} .

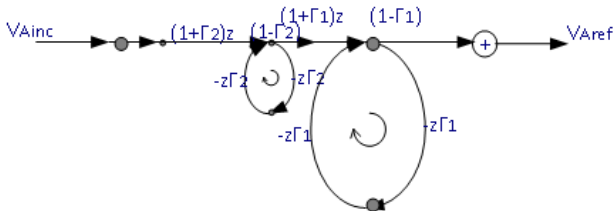


Рис. 7. Орієнтований граф для визначення S_{11}

На Рис. 8 показаний орієнтований граф після проведення редукції за методом Кюна, призначений для визначення S_{21} .

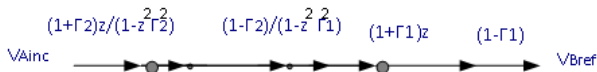


Рис. 8. Редукований орієнтований граф для S_{21} , позбавлений від контурів за третім топологічним правилом Кюна

Для того щоб впевнитися, що вирази для елементів матриці розсіювання вірні використаємо два методи редукції графів: топологічний за правилами Кюна та алгебраїчний за правилом неторкаючихся контурів Мезона. Результати розрахунків обома методами редукції орієнтованих графів співпали та наведені нижче

$$S_{21} = \frac{V_{ref.output}}{V_{inc.input}} = \frac{(1 + \Gamma_2) z}{1 - z^2 \Gamma_2} \cdot \frac{1 - \Gamma_2}{1 - z^2 \Gamma_1^2} \times (1 + \Gamma_1) z (1 - \Gamma_1). \quad (22)$$

Раніше при розгляді орієнтованого графа без дефекту під час переходу від виразу (8) до виразу (9) робили приведення до загального знаменника, але при всій подібності підходів для орієнтованого графа з врахування дефекту приводить до загального знаменника недоцільно

$$S_{11} = \frac{(1 - \Gamma_2^2)(1 - \Gamma_1^2)z^2(-z\Gamma_1)}{1 - (z\Gamma_1)^2} + \frac{(1 - \Gamma_2^2)z(-z\Gamma_2)}{1 - (z\Gamma_1)^2} + (\Gamma_1 + \Gamma_2)(1 + \Gamma_2)z. \quad (23)$$

Тепер виразимо S_{11} як функцію S_{21} аналогічно тому, як це було зроблено для орієнтованого графа діелектрика без дефекту

$$\frac{S_{11}}{S_{21}} = \frac{(1 - \Gamma_2^2)(1 - \Gamma_1^2)z^2(-z\Gamma_1)}{1 - (z\Gamma_1)^2} + \frac{(1 - \Gamma_2^2)z(-z\Gamma_2)}{1 - (z\Gamma_1)^2} + \frac{(\Gamma_1 + \Gamma_2)(1 + \Gamma_2)z}{(1 - (z\Gamma_1)^2)(1 - (z\Gamma_2)^2)}. \quad (24)$$

Після скорочення отримуємо

$$\frac{S_{11}}{S_{21}} = \frac{-z\Gamma_1}{1 - (z\Gamma_2)^2} + \frac{-\Gamma_2(1 - (z\Gamma_1)^2)}{(1 - \Gamma_1^2)} + \frac{(\Gamma_1 + \Gamma_2)(1 + \Gamma_2)z(1 - (z\Gamma_1)^2)(1 - (z\Gamma_2)^2)}{(1 - \Gamma_1^2)(1 - \Gamma_2^2)}. \quad (25)$$

З цього виразу можна знайти z та підставити у вираз для S_{21} , який більш простий з двох виразів для S-параметрів з врахуванням того, що Γ_2 відомо для певного матеріала філаменту для 3D друку.

4 Верифікація моделі. Окремий випадок $\Gamma_2 = 0$

Припустимо, що нема дефекта. Тоді $\Gamma_2 = 0$. Постає питання чи можна отримати з виразів (26) та (27) вирази (3) та (2)

$$S_{21} = \frac{(1 - \Gamma_1^2)z^2}{1 - (z\Gamma_1)^2}, \quad (26)$$

$$S_{11} = \frac{z(1-\Gamma_1^2)(-z^2\Gamma_1)}{1-(z\Gamma_1)^2} + \Gamma_1 z =$$

$$= \frac{-z^3\Gamma_1 + z^3\Gamma_1^3 + z\Gamma_1 - z^3\Gamma_1^3}{1-(z\Gamma_1)^2} = \frac{z\Gamma_1(1-z^2)}{1-(z\Gamma_1)^2}. \quad (27)$$

Але вираз (26) за умов $\Gamma_2 = 0$ відрізняється від виразу (3), а вираз (27) від виразу (2) на множник z . На Рис. 9 показаний орієнтований граф, призначений для визначення S_{11} , який отриманий з Рис. 6 за умов $\Gamma_2 = 0$. Штриховою лінією показаний шлях, який не враховується за умов відсутності дефекта $\Gamma_2 = 0$.

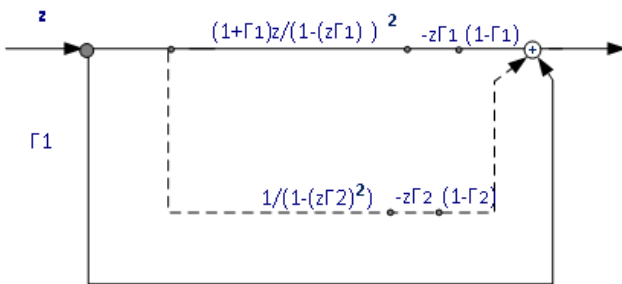


Рис. 9. Орієнтований граф, призначений для визначення S_{11}

Графічно ділянки графу, які відповідають за дефект (Рис. 9), усунуті з їхніми коефіцієнтами передачі $(1+\Gamma_2)(1-\Gamma_2)$. Але не позбулись множника z від дефекту (Рис. 9). Така сама ділянка є в орієнтованому графі для визначення S_{21} . Вони можуть взаємно скоротитися під час ділення. Відношення елементів матриці розсіювання відповідає формулі (13) для окремого випадку відсутності дефекта, що потрібно було довести.

Висновки

Огляд сучасних публікацій показав, що метод Ніколсона-Роса-Вейра для вимірювання параметрів діелектриків ще не вичерпав своїх можливостей. В нашій роботі удосконалюється модель та додаються засоби врахування дефектів в діелектриках на базі орієнтованих графів.

Удосконалення графічних моделей шляхом врахування дефекту проведено за допомогою моделей орієнтованих графів. Метод визначення коефіцієнтів передачі між вузлами орієнтованих графів дозволяє кількісно оцінити внесок дефектів в коефіцієнти передачі і відбиття матриці розсіювання. Ці коефіцієнти визначені за допомогою правила неторкаючихся контурів – одного з поширених методів редукції орієнтованих графів.

Новизна запропонованих рішень полягає в тому, що на базі відомого алгоритма Ніколсона-Роса-Вейра проведено удосконалення і побудована модель для дефекта філаменту 3D друку. На думку авторів, компроміс полягає в тому, що запропонований

метод вимагає апіорних даних щодо діелектричної проникності філаменту. Тоді за допомогою методу можна визначити параметри дефекта, але якщо невідомий матеріал і дефект в ньому, то можливі ускладнення з визначенням. Перспективним напрямком дослідження може бути розгляд окремих випадків, оцінювання метрологічних характеристик та невизначеності результатів вимірювання, порівняння з відомими методами дефектоскопії, наприклад, таким як метод теплових чотириполюсників, який розглядає каскадне включення дефектів в матеріал, використовує крім рівняння теплопровідності також лінійну алгебру для моделі та розв'язання системи рівнянь і цим схожий на розглянуту модель.

References

- [1] Chen L. F., Ong C. K., Neo C. P., Varadan V. V., Varadan V. K. (2004). *Microwave Electronics Measurement and Material Characterization*, Wiley, 549 p.
- [2] Nicolson A. M. (1968). Broad-band microwave transmission characteristics from a single measurement of the transient response. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 17, No. 4, pp. 395–402. DOI: 10.1109/TIM.1968.4313741.
- [3] Nicolson A. M., Ross G. F. (1970). Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 19, No. 4, pp. 377–382. DOI:10.1109/TIM.1970.4313932.
- [4] Ross G. F. (1970). A Simple Method for Obtaining the System Function of a Cascade Connection of Transmission Lines (Correspondence). *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, No. 18, pp. 738–740. DOI:10.1109/TMTT.1970.1127341.
- [5] Mason S. J. (1956). Feedback theory: Further properties of signal flow graphs. *Proceedings of the IRE*, No. 6, pp. 920–926.
- [6] Hunton J. K. (1960). Analysis of microwave measurement techniques by means of signal flow graphs. *IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, No. 8, pp. 206–212. DOI:10.1109/TMTT.1960.1124724.
- [7] Kuhn N. (1963). Simplified signal flow graph analysis. *Microwave Journal*, No. 6, pp. 59–66.
- [8] Rittner I. L., Fano W. G. (2018). Design and Evaluation of a Measurement Procedure to obtain the Electric Permittivity and the Magnetic Permeability. *Revista elektron*, Vol. 2, No. 1, pp. 30–38.
- [9] Choi H. E., Choi W., Simakov E. I. et al. (2019). Error Tolerant Method of Dielectric Permittivity Determination Using a TE 01 Mode in a Circular Waveguide at the W-Band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique*, Vol. 68, No. 2, pp. 808–815. DOI:10.1109/TMTT.2019.2951156.
- [10] Sun J., Lucyszyn S. (2018). Extracting complex dielectric properties from reflection-transmission mode spectroscopy. *IEEE Access*, Vol. 6, pp. 8302–8321. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2797698.

- [11] Sahin S., Nahar N. K., Sertel K. (2020). A simplified Nicholson–Ross–Weir method for material characterization using single-port measurements. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, Vol. 10, Iss. 4, pp. 404-410. DOI: 10.1109/TTHZ.2020.2980442.
- [12] Somlo, P. I., Hunter, J. D. (1985). Microwave impedance measurement. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, Vol. 10, Iss. 4, pp. 404-410. DOI: 10.1109/TTHZ.2020.2980442.
- [13] Miroshnyk, M., Zaichenko, O., Miroshnyk, A., Zaichenko, N. (2023). Graphical Models for Defectoscopy of Dielectrics. *XXXIII International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA)*, pp. 1-5, doi: 10.1109/MMA59144.2023.10317932.

Signal Flow Graphs as Mathematical Apparatus for Describing 3D Printing Filament Defects

Hapon N. Ya., Zaichenko O. B.

The relevance of the work lies in the study of filament defects using graphical models such as signal flow graphs.

The object of research is a graphic model of a filament defect for 3D printing. A review of modern publications showed that the Nicholson-Ross-Weir method for measuring dielectric parameters is used in serial vector network analyzers, which indicates its advantages over other measurement methods, but it has reserves for improvement. This method is based on a model in the form of signal flow graphs. The improvement of the Nicholson-Ross-Weir method consists, first, in the development of a

graphic model due to the addition of a defect in the form of a part of an signal flow graph. Secondly, the analysis of the analytical model built on the basis of oriented graphs revealed that the transmission coefficient of S_{21} is included in the reflection coefficient of S_{11} , which became useful when solving the system of nonlinear equations for S_{11} and S_{21} .

The purpose of the work is to create a graphic model, which is distinguished by the fact that it takes into account the defects of dielectrics, that is, the filament. The transition from a graphic model to an analytical model is carried out using such methods of simplification or reduction of oriented graphs as the topological method of Kuhn's rules and the algebraic method, namely Mason's rule of non-touching contours.

As a result, analytical expressions for the transmission coefficient of an signal flow graph, which is a model of a dielectric with a defect inside, at the output of S_{21} and the reflection coefficient at the input of S_{11} were obtained in two ways, and the results were compared with each other. The use of two independent topological and algebraic methods according to the classification of Somlo and Hunter allows to verify the obtained expressions for the elements of the scattering matrix S_{11} and S_{21} , which in turn are used in the Nicholson-Ross-Weir method.

Using the method of analogies of the classic Nicholson-Ross-Weir method and the same method with consideration of the defect for the defective material of the filament, an analytical dependence is derived that connects S_{21} and S_{11} by a functional relationship.

Keywords: signal flow graph; transmission coefficient; reflection coefficient; dielectric; defect